



Departamento de Ingeniería Química – FI – UNSJ

INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA

Carreras: Ing. Química – Ing. En Alimentos

CAPÍTULO V

PROCESOS Y VARIABLES DE LOS PROCESOS

Autoras:

Mg. Ing. Ana Cristina Deiana
Dra. Ing. Dolly Lucía Granados
Mg. Ing. María Fabiana Sardella

2018

CAPITULO V: PROCESOS Y VARIABLES DE LOS PROCESOS

Un ***proceso es cualquier operación o serie de operaciones que produce un cambio físico o químico en una sustancia o en una mezcla de sustancias***. La sustancia o sustancias que entran en un proceso se conocen como **entrada o alimentación** y aquellas que salen de é1 se llaman **salida o producto**.



Una **unidad de proceso** es un aparato o equipo donde se lleva a cabo una de las operaciones que constituyen el proceso. Cada unidad del proceso está asociada con un conjunto de **flujos o corrientes del proceso de entrada y salida**, que constituyen las sustancias que entran y salen de cada unidad. En la Figura 1.a) puede observarse un esquema del proceso para obtener monoclorodecano (producto principal) y diclorodecano (producto secundario) a partir de cloro y decano (entradas o alimentaciones). La Figura 1.b) representa el proceso para la obtención de cinc a partir de su mena y la 1.c) ejemplos de unidades de procesos.

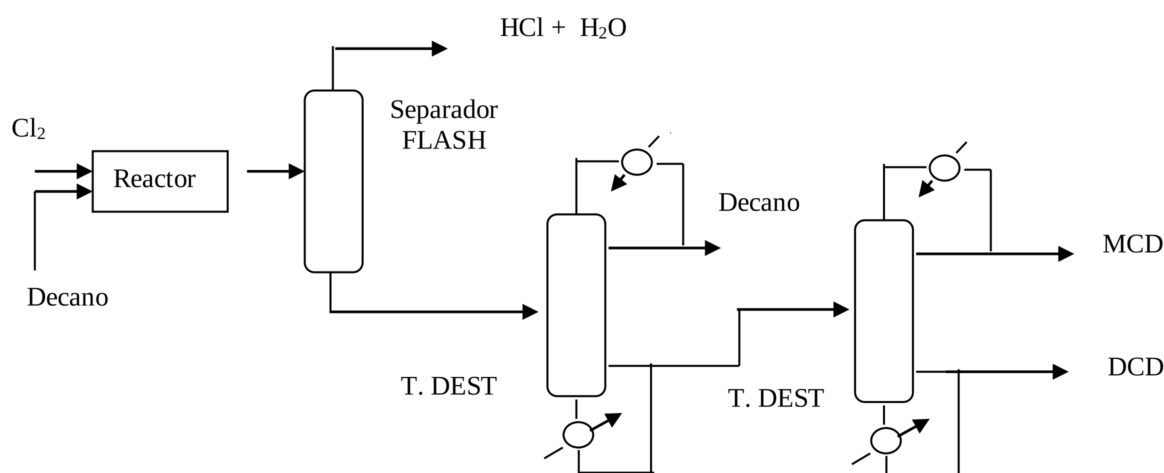


Figura 1.a) *Diagrama de flujo del proceso de producción de monoclorodecano*

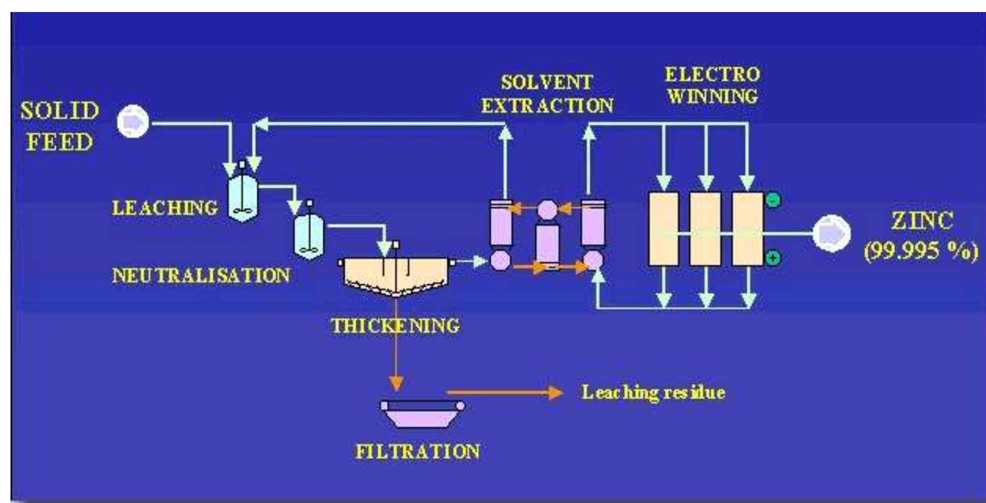


Figura 1.b). *Diagrama de flujo del proceso de obtención de cinc*

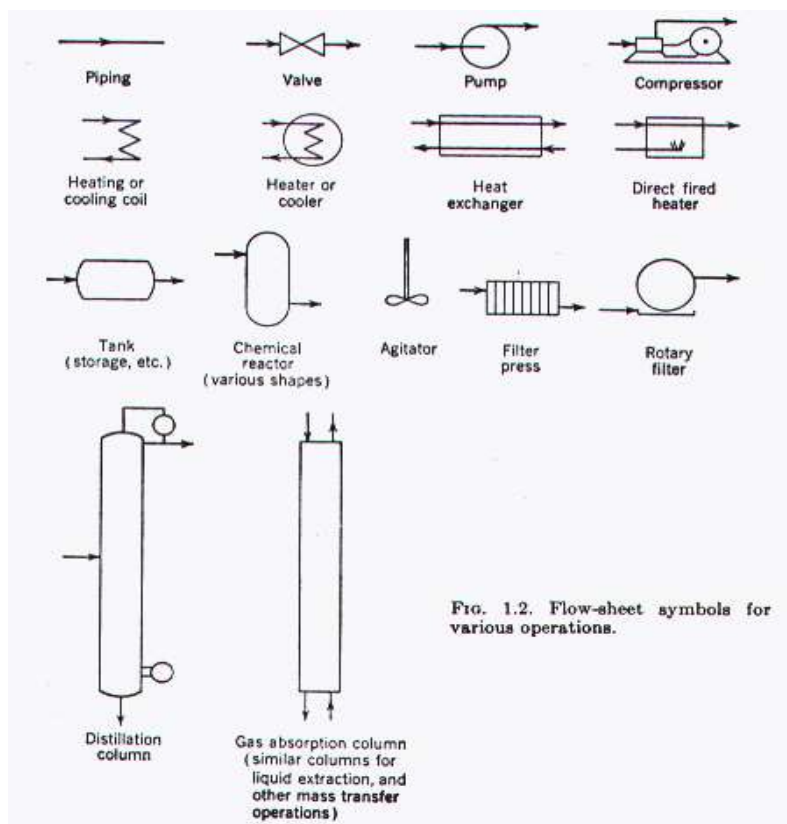


Figura 1.c- *Unidades de procesos*

MASA Y VOLUMEN

La *densidad de una sustancia es la masa por unidad de volumen de la misma* (m/v) Las unidades en que puede ser expresada son: **kg/m^3, g/cm^3, lb$_m$/ft^3,** etc.
Del mismo modo, el **volumen específico** se define como el volumen por unidad de masa de una sustancia y se expresa en **m^3/kg, ft^3/lb$_m$**, etc. Se puede calcular como la inversa de la densidad.
La densidad de los líquidos es función de la temperatura y pueden encontrarse, para fluidos puros, valores tabulados en la bibliografía clásica.
La densidad de una sustancia puede utilizarse como un factor de conversión para relacionar la masa y el volumen de una sustancia dada.

Ejemplo 1: se sabe que la densidad del tetracloruro de carbono es 1,595 g/cm^3,

a) ¿cuál será la masa correspondiente a un volumen de 20 cm^3 de $CC1_4$?
b) ¿y el volumen de 6,20 1b de esta misma sustancia?

a) $m = 20\ cm^3 . 1{,}595\ \frac{g}{cm^3} = 31{,}9\ g$

b) $V = 6{,}20\ lb \cdot \frac{454\ g}{1\ lb} \cdot \frac{cm^3}{1{,}595\ g} = 1760\ cm^3$

La **densidad relativa** de una sustancia es el cociente entre la densidad ρ de la misma y la densidad de una sustancia de referencia ρ_{ref} en determinadas condiciones:

$$DR = \frac{\rho}{\rho_{ref}}$$

La sustancia de referencia más frecuentemente utilizada para sólidos y líquidos es el **agua a 4,0°C**, que tiene la siguiente densidad:

ρref (H2O, 4ºC) =	1,00 g/cm3
	1000 kg/m3
	62,43 lb/pie3

De este modo, la densidad de un líquido o de un sólido en g/cm^3 es **numéricamente** igual a la densidad relativa de esa sustancia.

Si usted posee la densidad de una sustancia, multiplicándola por la densidad de la sustancia de referencia en cualquiera de sus unidades, obtiene la densidad de la sustancia en las mismas unidades. Por ejemplo, si la densidad relativa de un líquido es 2, su densidad es 2000 kg/m3 o 2 g/cm3 o 125 1b/pie3.

Ejemplo 2: Calcule la densidad del mercurio en lb/pie^3 y el volumen en pie^3 que ocupan 215 kg de esa sustancia. La densidad relativa del mercurio a 20°C es 13.546.

$$\rho = DR \, . \, \rho_{ref}$$

$$\rho = 13{,}546 \; . \; 62{,}43 \text{ lb/pie}^3 = 845{,}7 \text{ lb/pie}^3$$

$$V = 215 \cdot \frac{1\ lb}{0{,}454\ kg} \cdot \frac{pie^3}{845{,}7\ lb} = 0{,}560\ pie^3$$

VELOCIDAD DE FLUJO

Velocidad de flujo másico y volumétrico

Los procesos continuos involucran el movimiento de las sustancias de un punto a otro del sistema (**corrientes**), a1gunas veces entre unidades del proceso, otras desde las instalaciones de producción hasta el almacén de transporte o viceversa. La velocidad a la que se transporta una sustancia a través de una línea de un proceso es la **velocidad de flujo de esa sustancia.**

La velocidad de flujo de una corriente en un proceso puede expresarse como una **velocidad de flujo másico (masa/tiempo),** o bien como una **velocidad de flujo volumétrico (volumen/tiempo).** Supongamos que un fluido (un gas o un líquido) fluye a través del tubo cilíndrico como el que se muestra en la Figura 2, donde el área sombreada representa una sección perpendicular a la dirección del flujo. Si la velocidad de flujo másico del fluido se denomina **m** (kg/s), entonces esto significa que m kilogramos de fluido pasan a través de la sección transversal cada 1 segundo.

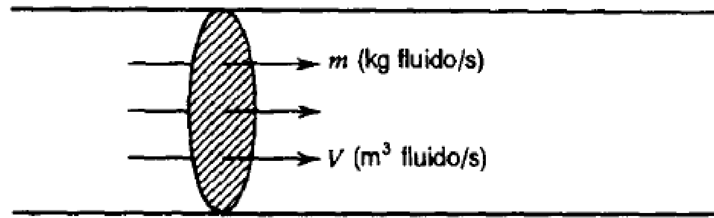


Figura 2. *Esquema del flujo de un fluido en una tubería.*

Si la velocidad de flujo volumétrico del fluido en esta sección transversal es **V** (m^3/s), significa que V metros cúbicos del fluido pasan a través de la sección transversal cada segundo. Recordemos que la masa m y el volumen V de un fluido no son cantidades independientes, sino que están relacionadas mediante la densidad del fluido ρ de la siguiente forma

$$\rho = m/V$$

Por lo tanto:

La densidad de un fluido puede utilizarse para convertir una velocidad de flujo volumétrico de una corriente en la velocidad de flujo másico de esa misma corriente o viceversa.

Medición de la velocidad de flujo

Un medidor de flujo es un dispositivo montado en la línea de un proceso, el cual proporciona una lectura continua de la velocidad de flujo en la línea. Existen numerosos dispositivos para medir velocidades de flujo.

Uno de los medidores más usados es el rotámetro (ver Figura 3), que consiste en un tubo vertical que contiene un flotador. Cuanto mayor sea la velocidad de flujo, tanto mayor será la altura que alcance el flotador en el tubo. De esta forma, la altura del flotador es directamente proporcional a la velocidad de flujo del fluido.

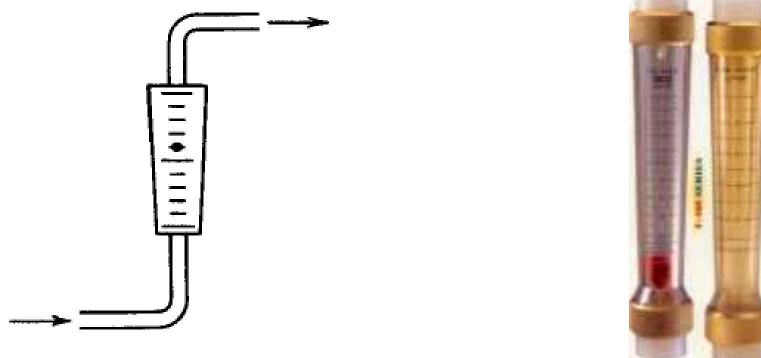


Figura 3. Esquema y foto de rotámetros

COMPOSICION QUIMICA

Moles y masa molar

El **peso atómico** de un elemento es la masa de un átomo *en una escala que asigna una masa de exactamente 12 al* ^{12}C (el isótopo del carbono cuyo núcleo posee seis protones y seis neutrones).

Por ejemplo: el oxígeno atómico (0), tiene un peso atómico de aproximadamente 16 y por lo tanto, la molécula de oxígeno (0_2) tiene una masa molar de aproximadamente 32.

Un **mol (o gramo-mol)** se define como la cantidad de sustancia que tiene:

- $6{,}022.10^{23}$ partículas (átomos o moléculas).
- una masa, expresada en gramos, igual a su masa molar.

La **masa molar** de una sustancia, usualmente llamada **peso molecular**, es la masa de un mol expresada en gramos. Se calcula como la suma de los pesos atómicos de los átomos que constituyen una molécula del compuesto y es expresada en unidades de masa/cantidad de sustancia. Las unidades más comunes son **g/mol**; **kg/kmol** y **lb/lbmol**. Ejemplo: el monóxido de carbono (CO) tiene una masa molar de 28; esto significa que 1 mol de CO contiene 28 g, 1 lb-mol contiene 28 1bm y 1 kmol contiene 28 kg.

Resumiendo: ***Si el peso molecular de una sustancia es M, entonces hay M kg/kmol, M g/mol y M lbm/lb-mol de esta sustancia***.

La masa molar puede utilizarse como un factor de conversión que relaciona la masa con el número de moles de una cantidad de sustancia.

Ejemplo 3: 34 kg de amoniaco (NH_3: M = 17) son equivalentes a:

$$34\ kg\ NH_3 \cdot \frac{1\ kmol\ NH_3}{17\ kg\ NH_3} = 2\ kmol\ NH_3$$

y 4 lb-mol de amoniaco son equivalentes a:

$$4\ lbmol\ NH_3 \cdot \frac{17\ lb\ NH_3}{1\ lbmol\ NH_3} = 68\ lb\ NH_3$$

Los mismos factores que se utilizan en la conversión de masa de una unidad a otra pueden utilizarse para convertir las unidades molares equivalentes.

Ejemplo 4: Conversión entre masa y mol
Dados 100 g de CO_2, responda:

a) ¿cuántos moles de CO_2 hay?

$$100\ g\ CO_2 \cdot \frac{1\ mol\ CO_2}{44\ g\ CO_2} = 2{,}273\ moles\ CO_2$$

b) ¿cuántos lb-moles de CO_2 hay?

$$2{,}273\ moles\ CO_2 \cdot \frac{1\ lbmol}{453{,}6\ moles\ CO_2} = 5{,}01\ .10^{-3}\ lbmoles\ CO_2$$

c) ¿ cuántos moles de C, O_2 y O hay?

Cada molécula de CO_2 contiene un átomo de C, una molécula de O_2 y dos átomos de O. Por lo tanto, cada 6,02x 10^{23} moléculas de CO_2 (1 mol) contiene 1 mol de C, 1 mol de O_2 y 2 moles de O. Entonces:

$$2{,}273\ moles\ CO_2 \cdot \frac{1\ mol\ C}{1\ mol\ CO_2} = 2{,}273\ moles\ C$$

$$2{,}273\ moles\ CO_2 \cdot \frac{1\ mol\ O_2}{1\ mol\ CO_2} = 2{,}273\ moles\ O_2$$

$$2{,}273\ moles\ CO_2 \cdot \frac{2\ mol\ 0}{1\ mol\ CO_2} = 4{,}546\ moles\ 0$$

d) ¿ cuántos gramos de O_2 hay?

$$4{,}546\ moles\ O \cdot \frac{16\ g\ O}{1\ mol\ O} = 72{,}7\ g\ O_2$$

$$2{,}273\ moles\ O_2 \cdot \frac{32\ g\ O_2}{1\ mol\ O_2} = 72{,}7\ g\ O_2$$

Observe que ambos procedimientos conducen al mismo resultado

e) ¿cuántas moléculas de CO_2 hay?

$$2{,}273\ moles\ CO_2 \cdot \frac{6{,}02\ \cdot 10^{23}}{1\ mol\ CO_2} = 1{,}37\ 10^{24}\ molécula$$

Los mismos factores que se utilizan en la conversión de masa de una unidad a otra pueden utilizarse para convertir las unidades molares equivalentes.

Por ejemplo, si fluye dióxido de carbono (CO_2: M = 44) por una tubería a una velocidad de 100 kg/h, la velocidad de flujo molar del CO_2 es:

$$500\ \frac{g}{min}\ CO_2 \cdot \frac{1\ mol\ CO_2}{44\ g\ CO_2} = 11{,}36\ \frac{mol}{min} CO_2$$

Si el flujo de salida de un reactor químico contiene CO_2 fluyendo a una velocidad de 850 lb-mol/min., la velocidad de flujo másico correspondiente es

$$850\ \frac{lbmol}{min}\ CO_2 \cdot \frac{44\ lb\ CO_2}{1\ lb\ mol\ CO_2} = 37400\ \frac{lb}{min}\ de\ CO_2$$

Fracciones en masa, fracciones molares y masa molar promedio

Ocasionalmente las corrientes de los procesos contienen una sola sustancia, pero con frecuencia consisten en mezclas de líquidos o gases o de disoluciones de uno o más solutos en un disolvente líquido.
Las siguientes cantidades pueden utilizarse para definir la composición de una mezcla de sustancias que incluye la especie A.

Fracciones másicas:

$$x_A = \frac{masa\ de\ A}{masa\ total}\left(\frac{kg\ de\ A}{kg\ totales}\ ó\ \frac{g\ de\ A}{g\ totales}\ ó\ \frac{lb\ de\ A}{lb\ totales}\right)$$

Las fracciones másicas pueden ser calculadas también a partir de velocidades de flujo másicas. En este caso su definición vendrá dada por las siguiente expresión:

$$x_A = \frac{velocidad\ de\ flujo\ másico\ de\ A}{velocidad\ de\ flujo\ másico\ total\ o\ de\ la\ mezcla}$$

Fracciones molares:

$$y_A = \frac{moles\ de\ A}{moles\ totales}\left(\frac{kmoles\ de\ A}{kmoles\ totales}\ ó\ \frac{moles\ de\ A}{moles\ totales}\ ó\ \frac{lbmoles\ de\ A}{lbmoles\ totales}\right)$$

Las fracciones molares también pueden ser calculadas a partir de velocidades de flujo molares:

$$y_A = \frac{velocidad\ de\ flujo\ molar\ de\ A}{velocidad\ de\ flujo\ molar\ total\ o\ de\ la\ mezcla}$$

Las fracciones másicas y molares deben cumplir la siguiente condición:

$$\sum y_i = 1$$

Debe notarse que se trata de una **propiedad adimensional**, por lo que es muy importante cuidar que las unidades en la expresión de cálculo de las fracciones sean homogéneas.
Se debe observar además que el valor numérico de una fracción másica o molar no depende de las unidades utilizadas en el numerador y el denominador, porque estas unidades son las mismas. Si la fracción en masa de benceno en una mezcla es 0,25, entonces x_{C6H6}, es igual a 0,25 kg de C_6H_6/kg totales, 0,25g de C_6H_6/g totales, 0,25 1bm de C_6H_6/lb_m totales y así sucesivamente.
Las expresiones porcentuales en una mezcla se calculan a partir de sus fracciones. El porcentaje en masa de A es 100 x_A y el porcentaje en mol de A es 100 y_A.

Ejemplo 5:

Una disolución contiene 15% en masa de A (x_A = 0,15) y 20% en mol de B (y_B = 0,20).

1. Calcule la masa de A en 175 kg de la disolución.

$$175\ kg\ de\ solución \cdot \frac{0{,}15\ kg\ de\ A}{kg\ de\ solución} = 26\ kg\ de\ A$$

2. Calcule la velocidad de flujo másico de A en una corriente de la disolución que fluye a una velocidad de 53lb/h.

$$53\ \frac{lb}{h}\cdot\frac{0{,}15\ lb\ de\ A}{lb}=8\ \frac{lb}{h}\ de\ A$$

3. Calcule la velocidad de flujo molar de B en una corriente de la disolución que fluye a una velocidad de 1000 mol/min.

$$1000\ \frac{moles}{min}\cdot\frac{0{,}20\ moles\ de\ B}{mol}=200\ \frac{moles\ de\ B}{min}$$

4. Calcule la velocidad de flujo de la disolución que corresponde a una velocidad de flujo molar de 28 kmol B/s.

$$28\ \frac{kmoles\ de\ B}{s}\cdot\frac{1\ kmol\ de\ disolución}{0{,}20\ kmoles\ de\ B}=140\ \frac{kmoles\ de\ disolución}{s}$$

5. Calcule la masa de la disolución que contiene 300 1b de A.

$$300\ lb\ de\ A\cdot\frac{1\ lb\ de\ disolución}{0{,}15\ lb\ de\ A}=2000\ lb\ de\ disolución$$

Ejemplo 6: Conversión de una composición en masa en una composición molar

Una mezcla de gases tiene la siguiente composición en masa:

16% de O_2
4,0% de CO
17% de CO2
63% de N_2

¿Cuál es la composición molar?
Base de cálculo: 100 g/h de la disolución

$$\mathrm{VFmolar}_{O_2}=100\ \frac{\mathrm{g\ totales}}{\mathrm{h}}\cdot\frac{0{,}16\ \mathrm{g\ de\ O_2}}{\mathrm{g\ totales}}\cdot\frac{1\ \mathrm{mol\ de\ O_2}}{32\ \mathrm{g\ de\ O_2}}=0{,}50\ \frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{h}}\ \mathrm{de\ O_2}$$

$$\mathrm{VFmolar}_{CO_2}=100\ \frac{\mathrm{g\ totales}}{\mathrm{h}}\cdot\frac{0{,}17\ \mathrm{g\ de\ CO_2}}{\mathrm{g\ totales}}\cdot\frac{1\ \mathrm{mol\ de\ CO_2}}{44\ \mathrm{g\ de\ CO_2}}=0{,}386\ \frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{h}}\ \mathrm{de}\ CO_2$$

$$\mathrm{VFmolar}_{N_2}=100\ \frac{\mathrm{g\ totales}}{\mathrm{h}}\cdot\frac{0{,}63\ \mathrm{g\ de\ N_2}}{\mathrm{g\ totales}}\cdot\frac{1\ \mathrm{mol\ de\ N_2}}{28\ \mathrm{g\ de\ N_2}}=2{,}25\ \frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{h}}\ \mathrm{de\ N_2}$$

$$\mathrm{VFmolar}_{CO}=100\ \mathrm{g\ totales}\cdot\frac{0{,}04\ \mathrm{g\ de\ CO}}{\mathrm{g\ totales}}\cdot\frac{1\ \mathrm{mol\ de\ CO}}{28\ \mathrm{g\ de\ CO}}=0{,}143\ \frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{h}}\ de\ CO$$

$$VFmolar_{Total} = VFmolar_{O_2} + VFmolar_{CO} + VFmolar_{CO_2} + VFmolar_{N_2} = 3{,}279\ \frac{mol}{h}$$

$$y_{O_2} = \frac{0{,}500\ mol/h}{3{,}279\ mol/h} = 0{,}15\ \frac{moles\ de\ O_2}{moles\ totales}$$

$$y_{CO_2} = \frac{0{,}386\ mol/h}{3{,}279\ mol/h} = 0{,}12\ \frac{moles\ de\ CO_2}{moles\ totales}$$

$$y_{CO} = \frac{0{,}143\ mol/h}{3{,}279\ mol/h} = 0{,}04\ \frac{moles\ de\ CO}{moles\ totales}$$

$$y_{N_2} = \frac{2{,}25\ mol/h}{3{,}279\ mol/h} = 0{,}69\ \frac{moles\ de\ N_2}{moles\ totales}$$

Se verifica que se cumple la condición: $\sum y_i = 1$

Concentración

La **concentración en masa** de un componente en una mezcla o disolución es la masa de este componente por unidad de volumen de la mezcla (g/cm^3, lb_m/ft^3, kg/in^3,...).

La **concentración molar** de un componente es el número de moles del componente por unidad de volumen de la mezcla (mol/m^3, $kmol/m^3$, $lb\text{-}mol/ft^3$,…). La **molaridad** de una disolución es la cantidad de moles de soluto presentes por litro de disolución y se expresa en mol/L.

La concentración de una sustancia en una mezcla o en una disolución puede utilizarse como un ***factor de conversión para relacionar la masa (o moles) de un componente en una muestra de la mezcla con el volumen de la muestra*** o para ***relacionar la velocidad de flujo másico (o molar) de un componente de un flujo continuo con la velocidad de flujo volumétrico del mismo.***

Por ejemplo, en una disolución 0,02 molar de NaOH, 5 litros de la misma contienen:

$$5\ litros \cdot \frac{0{,}02\ mol\ NaOH}{litro} = 0{,}1\ mol\ NaOH$$

y si esta disolución fluye a una velocidad de 2 litros/min., la velocidad de flujo molar del NaOH es:

$$2\ \frac{litro}{min} \cdot \frac{0{,}02\ mol\ NaOH}{litro} = 0{,}04\ \frac{mol\ NaOH}{min}$$

Ejemplo 7: Conversión entre velocidades de flujo másico, molar y volumétrico de una disolución

Una disolución acuosa de ácido sulfúrico 0,50 molar fluye hacia una unidad de proceso a una velocidad de $1{,}25 m^3/min$. La densidad relativa (DR) de la disolución es 1,03. Calcular:

a) la concentración en masa de H_2SO_4 expresada en unidades del SI
b) la velocidad de flujo másico del H_2SO_4 expresada en unidades del SI
c) la fracción en masa de H_2SO_4

a)

$$\frac{0{,}50 \text{ moles de } H_2SO_4}{\text{litro}} \cdot \frac{98 \text{ g}}{\text{mol}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}} \cdot \frac{10^3 \text{ litros}}{\text{m}^3} = 49 \frac{\text{kg } H_2SO_4}{\text{m}^3}$$

b)

$$\frac{1{,}25 \text{ m}^3}{\text{min}} \cdot \frac{49 \text{ kg } H_2SO_4}{\text{m}^3} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 1{,}02 \frac{\text{kg } H_2SO_4}{\text{s}}$$

c) La fracción en masa de H_2SO_4 es igual al cociente de la velocidad de flujo másico de H_2SO_4, el cual conocemos, y la velocidad de flujo másico total, que puede calcularse a partir de la velocidad de flujo volumétrico y de la densidad de la disolución.

$$\rho_{disolución} = DR.\rho_{ref}$$

$$\rho_{disolución} = 1{,}03.1000 \frac{kg}{m^3} = 1030 \frac{kg}{m^3}$$

$$\frac{1{,}25 \; m^3 \; solución}{min} \cdot \frac{1030 \; kg}{m^3 solución} \cdot \frac{1 \; min}{60 \; s} = 21{,}46 \frac{kg}{s}$$

$$x_{H_2SO_4} = \frac{1{,}02 \; kg \; de \; H_2SO_4/s}{21{,}46 \; kg \; de \; disolución/s} = 0{,}048 \frac{kg \; de \; H_2SO_4}{kg \; de \; disolución}$$

PRESION

Presión de un fluido y columna hidrostática

La presión es el cociente entre una fuerza y el área sobre la que actúa la fuerza. Por lo tanto, las unidades de la presión son las unidades de la fuerza divididas en las unidades de área (es decir, N/m^2, $dinas/cm^2$ y lb_f/in^2 o psi). En el sistema SI es N/m^2 que se conoce como **pascal (Pa)**.

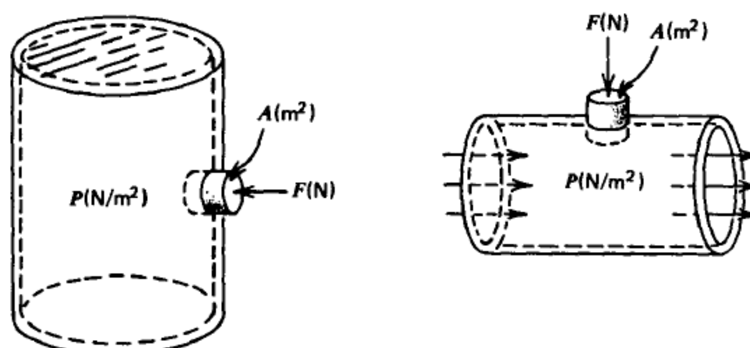


FIGURA 4

Presión de un fluido en un tanque y en un tubo

Consideremos un fluido (gas o líquido) contenido en un recipiente cerrado o fluyendo a través de un tubo y supongamos que en la pared del recipiente hay un orificio de área A, como se muestra en la figura 4. **La presión del fluido puede definirse como el cociente F/A, donde F es la fuerza mínima que se debe ejercer sobre una tapa en el orificio para evitar que el fluido escape del recipiente.**

Debemos presentar una definición adicional de la presión de un fluido para explicar el concepto de presión atmosférica y para discutir los métodos usuales de medición de presiones de los fluidos en tanques y tubos. Supongamos una columna vertical de fluido de altura h (m), que tiene un área de sección transversal uniforme A (m^2). Supongamos, además, que el fluido tiene una densidad ρ (kg/m^3) y que se ejerce una presión P_0 (N/m^2) sobre la superficie superior de la columna (Ver Fig 5).

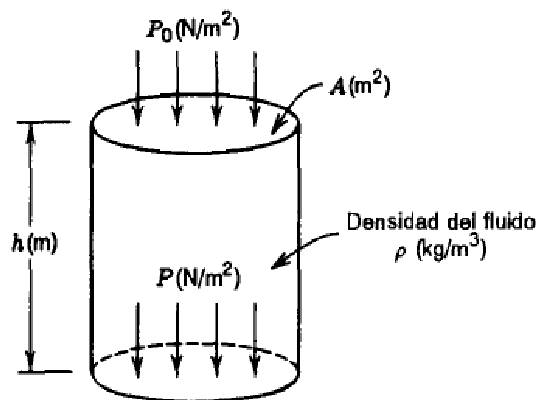


FIGURA 5
Presión en la base de la columna de un fluido

La presión P del fluido en la base de la columna, llamada **presión hidrostática del fluido**, es, por definición, la fuerza F ejercida sobre la base dividida por el área de la base A. F debe ser igual a la suma de la fuerza sobre la superficie superior y el peso del fluido en la columna. No es difícil demostrar que

$$P = P_o + \rho . g . h$$

Como el área A no aparece en esta ecuación, la formula se puede aplicar a una columna de fluido tan estrecha como un tubo de ensayo o tan ancha como el océano.

Además de que la presión puede expresarse como una fuerza por unidad de área, ésta puede escribirse como una columna de un fluido particular; esto es, como la altura de una columna hipotética de este fluido que ejercería una determinada presión en su base, si la presión en la parte superior de esta fuese cero. Se puede hablar entonces de una presión de 14,7 psi o en forma equivalente, de una presión (o columna) de 33,9 pies de agua (33,9 ft de H_2O) o 76 cm de mercurio (76 cm Hg). La equivalencia entre una presión P (fuerza/área) y la columna correspondiente h (altura de un fluido) la proporciona la ecuación anterior con $P_0 = 0$.

Ejemplo 8: Cálculo de la presión como la altura de una columna de un fluido

Exprese una presión de 2×10^5 Pa en mm de Hg.

Aplicando la ecuación anterior para h (mm de Hg), sabiendo que $g = 9{,}8\ m/s^2$ y considerando que la densidad relativa del mercurio es 13600 kg/m^3.

$$h = \frac{P}{g.\rho_{Hg}} = \frac{2\,.10^5 N}{m^2} \cdot \frac{m^3}{13600\ kg} \cdot \frac{s^2}{9{,}807\ m} \cdot \frac{10^3 mm}{1\ m} = 1{,}50.10^3 mm\ de\ Hg$$

Las unidades mm de Hg pueden sustituirse por cualquier otra unidad de longitud y cualquier otra sustancia.
Existen tablas de conversión que presentan valores de presión expresados en diferentes unidades usuales de fuerza/área y como columnas de mercurio y de agua. El uso de esta tabla para la conversión de unidades de presión se muestra con la conversión de 20 psi a cm de Hg.

$$20\ psi \cdot \frac{76\ cm\ Hg}{14{,}696\ psi} = 103\ cm\ Hg$$

Ejemplo 9: Presión bajo la superficie de un fluido

¿Cuál es la presión a 30 m por debajo de la superficie de un lago? La presión atmosférica (la presión en la superficie) es de 10,4 m de H_2O y la densidad del agua es de 1000 kg/m^3. Exprese el resultado en unidades del SI.

Hay dos caminos para resolver este problema.

Opción 1: Para la resolución utilizaremos la ecuación:

$$P = P_o + \rho.g.h$$

Primero debemos convertir la presión atmosférica a unidades de presión del SI:

$$P_o = 10{,}4\ m\ H_2O \cdot \frac{1{,}013 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}}{10{,}33\ m\ H_2O} = 1{,}01.10^5 Pa$$

$$P\ (Pa) = 1{,}01.10^5 Pa + 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{9{,}807\ N}{kg} \cdot 30\ m = 3{,}96 \cdot 10^5 Pa$$

Opción 1: Ahora tomemos el camino fácil. Haremos uso del concepto de que una presión puede ser expresada como una altura de fluido. Así:

$$P\ (m\ H_2O) = 10{,}4\ m\ H_2O + 30\ m\ H_2O = 40{,}4\ m\ H_2O$$

Luego solo resta calcular la presión en unidades de F/A que corresponde a esta altura de agua

$$P = \rho.g.h$$

$$P\ (Pa) = 1{,}01.10^5 Pa + 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{9{,}807\ N}{kg} \cdot 30\ m = 3{,}96 \cdot 10^5 Pa$$

Presión atmosférica, presión absoluta y presión manométrica

La presión de la atmósfera puede considerarse como la presión en la base de una columna de fluido (aire) localizada en el punto de la medición (por ejemplo, al nivel del mar). La presión P_0 en la parte superior de la columna es igual a cero y ρ y g son los valores promedio de la densidad del aire y de la aceleración de la gravedad entre la parte superior de la atmósfera y el punto de medición.

$$P = P_o + \rho \,.\, g \,.\, h$$

Se ha asignado al valor de la presión atmosférica al nivel del mar (760 mm de Hg) el valor estándar de 1 atmósfera.
Las presiones de los fluidos que hemos mencionado son todas presiones absolutas, ya que una presión de cero corresponde al vacío perfecto. Muchos aparatos de medición de presión proporcionan la presión manométrica de un fluido o la presión en relación con la presión atmosférica. Una presión manométrica de cero indica que la presión absoluta del fluido es igual a la presión atmosférica. La fórmula de conversión entre presiones absolutas y manométricas es:

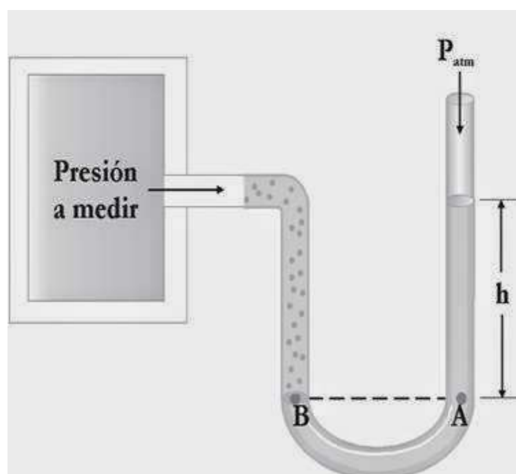
$$P_{absoluta} = P_{manométrica} + P_{atmosférica}$$

Las abreviaturas psia y psig se utilizan frecuentemente para denotar presiones absolutas y manométricas, respectivamente, en lb_f/pul^2. También es usual referirse a presiones manométricas negativas (presiones absolutas menores que la atmosférica) como cantidades positivas de vacío; por ejemplo, una presión manométrica de -1 cm de Hg (75,0 cm de Hg absolutos, si la presión atmosférica es de 76,0 cm de Hg) puede denominarse también 1 cm de vacío.

Medición de la presión de un fluido

a) Medidores de columna de líquido

Un manómetro es, en general, un tubo en forma de U parcialmente lleno con un líquido de densidad conocida (el fluido manométrico). Cuando los extremos del tubo están expuestos a diferentes presiones, el nivel del fluido disminuye en el brazo de alta presión y aumenta en el de baja presión. La diferencia entre las presiones puede calcularse a partir de la diferencia medida entre los niveles del líquido en cada brazo.



b) Medidores mecánicos

Existen varios aparatos mecánicos que se utilizan para medir la presión de fluidos. El más común de estos equipos es el **manómetro de Bourdon**, que es un tubo hueco cerrado en uno de sus extremos y doblado en forma de C. El extremo abierto del tubo está expuesto al fluido cuya presión se desea medir. A medida que aumenta la presión, el tubo tiende a enderezarse produciendo el movimiento de rotación de una aguja unida al tubo. La posición de la aguja sobre un disco calibrado indica la presión manométrica del fluido. La figura 6 muestra un diagrama esquemático de un manómetro de Bourdon.

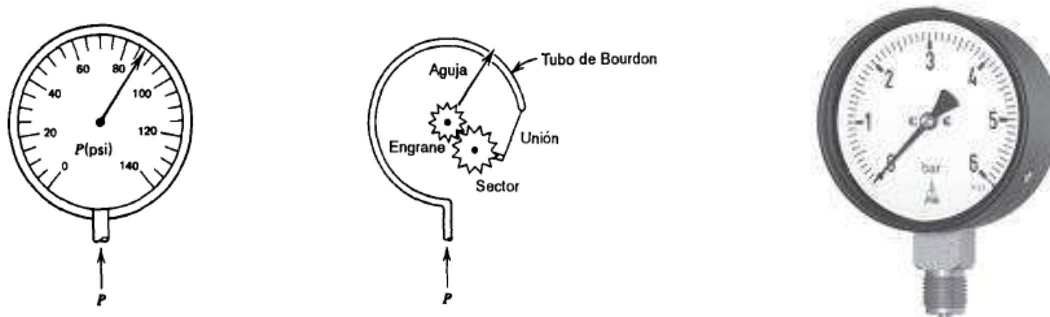


Figura 6. Manómetro de Bourdon

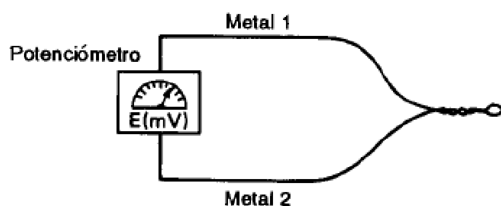
TEMPERATURA

La temperatura de una sustancia en un estado de agregación en particular (sólido, líquido o gas) es una medida de la energía cinética promedio que poseen las moléculas que forman la sustancia. Como esta energía no puede medirse directamente, la temperatura debe determinarse indirectamente midiendo alguna propiedad física de la sustancia cuyo valor depende de la temperatura de una manera conocida. Tales propiedades y los equipos de medición de temperatura basados en ellas, incluyen la resistencia eléctrica de un conductor (**termómetro de resistencia**), el voltaje en la unión de dos metales diferentes (**termopar**), el espectro de radiación emitida (**pirómetro**) y el volumen de una masa fija de un fluido (**termómetro**).





Un termopar es un aparato para medir temperatura que consiste en dos alambres de metal distintos unidos por un extremo.





El voltaje generado en la unión metálica se registra en un potenciómetro o milivoltimetro. Cuando se utilizan ciertos metales, el. voltaje varía linealmente con la temperatura en la unión de los dos metales.

Los termómetros están constituidos por un bulbo de vidrio lleno con un fluido (generalmente mercurio) y que se comunica con un extremo de un tubo muy delgado denominado capilar. Este tubo está cerrado en su otro extremo, en el cual se ha hecho vacío previo a su llenado. La dilatación o contracción de la masa del fluido ante variaciones de su temperatura se manifiesta como variaciones de su longitud, que son lineales con la temperatura.



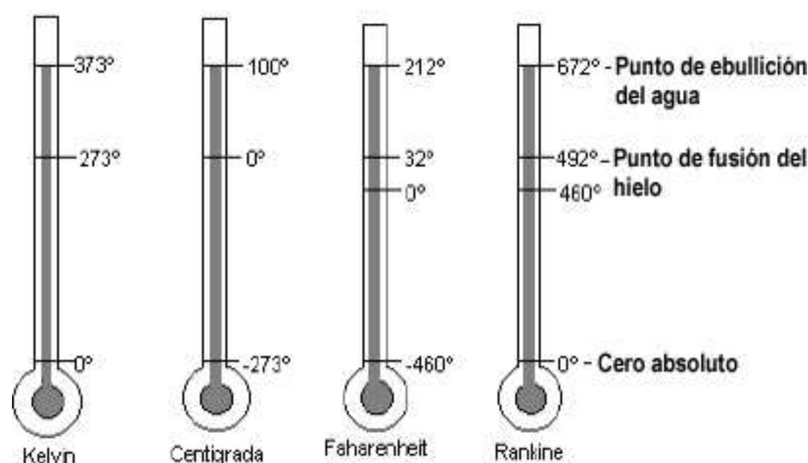
Las escalas de temperatura pueden definirse en términos de propiedades físicas sencillas, tales como los puntos de congelación y la ebullición, que tienen lugar a temperaturas y presiones constantes. Una escala de temperatura definida se obtiene asignando arbitrariamente valores numéricos a dos temperaturas medibles y reproducibles; por ejemplo, se asigna un valor de 0 al punto de congelación del agua y un valor de 100 a su punto de ebullición, a una presión de 1 atm. Esto especifica completamente la escala, ya que además de localizar estos dos puntos, aclara que la longitud de una unidad de intervalo de temperatura (llamada un grado) es l/100 de la distancia entre los dos puntos de referencia en la escala.

Las dos escalas más comunes de temperatura se definen utilizando el punto de congelación (T_f) y el punto de ebullición (T_b) del agua a una presión de 1 atm.

Escala Celsius (o centígrada): A T_f se le asigna un valor de 0 °C y a T_b se le asigna un valor de 100 °C. El cero absoluto (teóricamente la temperatura mas baja que se puede alcanzar en la naturaleza) en esta escala corresponde a -273,15 °C.

Escala Fahrenheit. A T_f se le asigna un valor de 32 °F y a T_b se le asigna uno de 212 °F. El cero absoluto corresponde a -459,67 °F.

Las escalas Kelvin y Rankine se definen de forma que el cero absoluto corresponde a un valor de cero y el tamaño de un grado sea igual a un grado Celsius (en la escala Kelvin) o a un grado Fahrenheit (en la escala Rankine).

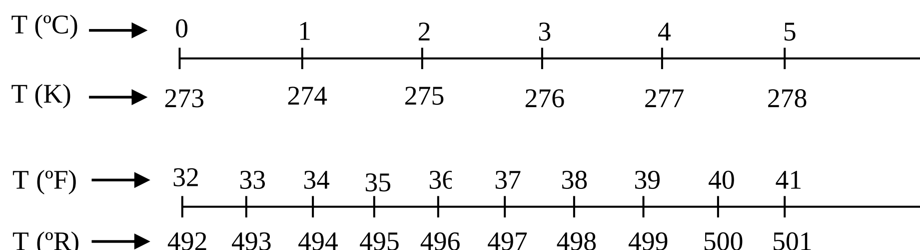


Las siguientes relaciones pueden utilizarse para convertir una temperatura expresada en una unidad de una escala definida en su equivalente en otra.

T(K) = T(ºC) + 273,15 (E-1)
T (ºR) = T (ºF) + 459,67 (E-2)
T (ºR) = 1,8 T (K) (E-3)
T (ºF) = 1,8 T (ºC) + 32 (E-4)

Un grado es tanto un valor de temperatura como un intervalo de temperatura, hecho que a veces lleva a confusiones. Consideremos el intervalo de temperatura de 0°C a 5°C. Hay nueve grados Fahrenheit y Rankine en este intervalo y solo cinco grados Celsius y Kelvin. Un intervalo de 1 grado Celsius o Kelvin contiene, por tanto, 1,8 grados Fahrenheit o Rankine, lo que nos conduce a los siguientes **factores de conversión para intervalos de temperatura**:

$$\frac{1{,}8°F}{1°C}, \frac{1{,}8°R}{1K}, \frac{1°F}{1°R}, \frac{1°C}{1K}$$



Nota: Estos factores de conversión se refieren a intervalos de temperatura, no a valores de temperatura. Por ejemplo, para encontrar el número de grados Celsius entre 32°F y 212°F se puede decir que:

$$\Delta T(°\mathrm{C}) = (212-32)°\mathrm{F}\cdot\frac{1°\mathrm{C}}{1{,}8°\mathrm{F}} = 100°\mathrm{C} \qquad \text{(E-5)}$$

pero para encontrar la temperatura Celsius correspondiente a 212°F se debe utilizar la ecuación E-4:

T (ºF) = 1,8 T (ºC) + 32

$$T(°\mathrm{C}) = \frac{T\ (°F)\ -32}{1{,}8°\mathrm{F}}$$

$$T(°\mathrm{C}) = \frac{212-32}{1{,}8°\mathrm{F}} = 100°C$$

Ejemplo 10: Conversión de temperatura

Considérese el intervalo entre 20°F y 80°F.
1. Calcule las temperaturas equivalentes en °C y el intervalo entre ellas.
2. Calcule directamente el intervalo en °C entre esas temperaturas.

1. De la ecuación E-4

$$T(°\mathrm{C}) = \frac{T(°\mathrm{F})-32}{1{,}8}$$

de modo que:

$$T_1 = \frac{20-32}{1{,}8} = -6{,}7°\mathrm{C}$$

$$T_2 = \frac{80-32}{1{,}8} = 26{,}6°\mathrm{C}$$

$$T_2 - T_1 = 26{,}6-(-6{,}7) = 33{,}3°\mathrm{C}$$

2. De la ecuaci6n E-5

$$\Delta T\ (°\mathrm{C}) = \Delta T(°\mathrm{F})\cdot\frac{1°\mathrm{C}}{1{,}8°\mathrm{F}} = (80-20)°\mathrm{F}\cdot\frac{1°\mathrm{C}}{1{,}8°\mathrm{F}} = 33{,}3°\mathrm{C}$$

que coincide con la parte 1, como esperábamos.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Cuáles son las unidades de la densidad relativa?

2. Un líquido tiene una densidad relativa de 0,50. ¿Cuál es su densidad en g/cm^3?, ¿Cuál es su volumen específico en cm^3/g? ¿Cuál es su densidad en lb/pie^3? ¿Cuál es la masa de 3,0 cm^3 de este líquido? ¿Qué volumen ocupan 18 g?

3. Calcula la densidad en kg/m^3 de:

- Un líquido con densidad ρ = 68,5 $1b/ft^3$
- Un sólido con una densidad relativa de 7,8.

4. La densidad relativa del nitrobenceno es de 1,20.

(a) Calcula la masa en kg de 250 litros de nitrobenceno.

(b) Calcula la velocidad de flujo volumétrico en ml/min que corresponde a una velocidad de flujo másico de 30 lb de nitrobenceno/h.

5. La velocidad de flujo másico del n-hexano (ρ= 0,659g/cm^3) en un tubo es de 6,59 g/s. ¿Cuál es su velocidad de flujo volumétrico?

6. La velocidad de flujo volumétrico del $CC1_4$ (ρ= 1,595 g/cm^3) en un tubo es de 100 cm^3/min. ¿Cuál es su velocidad de flujo másico?

7. Una corriente de agua alimenta una probeta graduada por exactamente 30 s, tiempo durante el cual se colectan 50 ml. ¿Cuál es la velocidad de flujo volumétrico del flujo? ¿Cuál es la velocidad de flujo másico?

8. Qué es un rotámetro?

9. ¿Qué es un mol de una sustancia de masa molar M en términos (a) del número de moléculas y (b) de masa?

10. ¿Cuántas toneladas y cuántos gramos tiene una tonelada-mol de una sustancia?

11. ¿Cuántos gramo-mol de C_3H_8 contienen 2 kmol de esta sustancia?

12. ¿Cuántas de cada una de las siguientes unidades están contenidas en 10 kmol de propano? (a) g de C_3H_8; (b) mol de C_3H_8; (c) lb-mol de C_3H_8; (j) moléculas de C_3H_8.

13. Un reactor se alimenta con 100 kg/h de hidrógeno molecular (H_2) cada hora. ¿Cuál es la velocidad de flujo molar de este flujo en kmol/hora?

14. Un reactor se alimenta con 65 metros cúbicos por hora de benceno ($\rho_{benceno}$: 0,879 g/cm^3)

(a) ¿Cuá1 es la velocidad de flujo másico de esta corriente en unidades del SI?

(b) ¿Cuál es la velocidad de flujo molar en unidades del SI?

15. Una mezcla de gases contiene cantidades equimolares de etileno (C_2H_4), etano (C_2H_6) y propano (C_3H_8). Calcula las fracciones molares de los componentes en la mezcla.

16. A través de un tubo fluyen 100 lb/min de A (M = 2) y 300 lb/min de B (M = 3). ¿Cuáles son las fracciones en masa y las fracciones molares de A y B, la velocidad de flujo másico de A, la velocidad de flujo molar de B, la velocidad de flujo másico total y la velocidad de flujo molar total de la mezcla?

17. Define (a) la presión de un fluido que fluye en un tubo, (b) la presión hidrostática, y (c) la columna de un fluido que corresponde a una determinada presión.

18. ¿La presión atmosférica es siempre igual a 1 atm?

19. ¿Qué es la presión absoluta? ¿Y la presión manométrica?

20. Efectúa las siguientes conversiones de presión:

(a) 1250 mm de Hg en psi

(b) 25 bar en kPa

(c) 350 atm en N/cm^2

(d) 100 cm de Hg en $dinas/m^2$

21. ¿Qué es un manómetro de Bourdon?

23. Convierte las siguientes temperaturas (a y b) e intervalos de temperatura (c y d)

(a) T = 20°C en °F, K, °R

(b) T = -15°F en °C, °R, K

(c) ΔT = 20°C en °F, K, °R

(d) ΔT = 100°R en °F, °C, K